論文　表面含浸材および樹脂を用いたコンクリートの材料改質に関する実験的研究

今本　啓一[*1]・柏木　里美[*2]・清原　千鶴[*3]

要旨：黎明期に建設された RC 造の歴史的文化財を対象とし，表面含浸材と樹脂を用いた補強方法を提案した。本実験の範囲内では，含浸材においてはシラン系よりもケイ酸塩系の方が圧縮強度増進に対して効果的であることが示され，樹脂においてはエポキシ樹脂が最も高い効果を発揮した。また，含浸の工法としては，刷毛やスプレーによる塗布よりも減圧環境下において含浸させることで，より高い圧縮強度増進効果が確認された。さらに，圧縮強度と超音波伝播速度との間には有意な相関が示され，含浸材による強度増進効果が非破壊的に評価可能であることが明らかとなった。

キーワード：コンクリート，モルタル，圧縮強度，表面含浸材，樹脂

1. はじめに

歴史的文化財の保存・修復にあたって留意されていることの一つに，外観を極力変化させないようにすることが挙げられると考える。文化財の耐震補強に関して，近年ではレトロフィット工法などが普及しているが，部分的な補強などを想定した場合には，より簡便な手法が望ましい。一方，当時の蔵の工法としては外壁にレンガを用いることが一般的であったが，著者らが調査した文献[1)]に示される蔵は内部の柱・梁軸組が木，外壁が厚さ約 7cm の粗骨材最大径 10mm ほどのコンクリートを用いた RC であった。コンクリートの普及に伴って現れた黎明期の構法と思われるが，本研究はこの蔵の保存に資することを目的とし，コンクリートの強度向上に関して検討を行ったものである。本論文では，各材料の有効性の検証，最適工法の検討，および評価方法について示す。

2.【実験 1】コンクリートの圧縮強度回復に関する検証

2.1 実験概要

本実験は，コンクリートの圧縮強度回復に対する含浸材および樹脂の効果の有無を明らかにすることを目的としている。含浸材は**表－1** の A～L に示す計 12 種類を用い，うち 1 種類はシラン系含浸材 E とケイ酸塩系含浸材 F を 1:9 で混合したもの（以下，混合系）となっている。なお，**表－1** 中のケイ酸塩系含浸材 M については，後述する実験 2 で使用するものを併せて記載している。また，樹脂は**表－2** に示す計 4 種類を用い，うち 1 種類は 1 液型エポキシ樹脂に超微粒子特殊骨材を混合したものとなっている。試験体は，竣工後約 100 年を迎える建造物を模擬し，文献[1)]の調査結果に基づく 5N/mm^2 程度の圧縮強度を想定した調合を計画して作製した。含浸材用には φ100×200 (mm) のコンクリート試験体を，樹脂用には 40×40×40 (mm) のモルタル試験体を用いた。

コンクリートの調合表を**表－3** に示す。当時とセメントの品質が異なるため，文献[1)]のコンクリート強度 5.6N/mm^2 を得るためには**表－3** に示す水セメント比となった。必ずしも当時のコンクリートと同等に扱うことはできないが，本研究の目的がコンクリート強度の向上に目標を置いていることから，研究の第一段階として本調合のコンクリートに対して材料および工法の検討を行う

表－1　含浸材一覧および標準塗布仕様

記号	分類	塗布量 (g/m^2)	塗布回数	塗布方法	養生方法
A	シラン系	130	1	刷毛	気中
B		264	1	刷毛	気中
C		200	1	刷毛	気中
D		200	1	刷毛	気中
E+F	混合系	263	2	刷毛	気中
F	ケイ酸塩系	499	1	刷毛	気中
G		232	1	刷毛	気中
H		350	1	スプレー	湿潤
I		200	1	刷毛	湿潤
J		257	1	スプレー	気中
K		250	2	刷毛	湿潤
L	有機系乳剤	200	1	スプレー	気中
M	ケイ酸塩系	200	1	刷毛	気中

表－2　樹脂一覧

記号	分類	主成分
a	1液型	エポキシ樹脂，ケチミン
a+b	1液型＋粉体	エポキシ樹脂＋超微粒子特殊骨材
c	2液混合型	エポキシ樹脂
d	1液型	ポリウレタン樹脂

表－3　コンクリート調合表

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3) W	C	S	G	Ad (kg/m^3)	AE (C×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
150	53	180	120	1009	917	0.34	0.0005	7.5	4.0

C:普通ポルトランドセメント，S：陸砂，G：砕石，Ad：AE 減水剤

*1 東京理科大学　工学部建築学科教授　博士(工学)　(正会員)
*2 東京理科大学大学院　工学研究科建築学専攻
*3 東京理科大学　工学部建築学科嘱託助教　博士(工学)　(正会員)

こととした。なお，モルタル試験体についてはコンクリートと同様に水セメント比を 150%とし，W:C:S=1.5 : 1 : 8 とした。

2.2 測定項目

含浸材については圧縮強度，中性化深さ，色差および光沢度を，樹脂については圧縮強度のみを測定した。

2.3 実験方法

打込み後は全ての試験体の上面にキャッピングを施し，脱型まで封緘養生とした。脱型は材齢 4 日に行い，上下面にアルミテープでシールした後，気中養生とした。材齢 7 日において，全ての試験体を 50℃の乾燥炉に移した。材齢 14 日において，**表－1** に示す標準塗布仕様にしたがって各含浸材を試験体側面に塗布し，温度 20℃，相対湿度 60%の恒温環境下に静置した。なお，ケイ酸塩系含浸材 H, I, および K については，湿らせた布で覆った試験体をラップで封緘し，湿潤状態を保持した養生方法（以下，湿潤養生）を塗布後 7 日間継続させた後，他の試験体と同様に恒温環境下へ移した。その後，塗布後材齢 28 日において圧縮強度試験，色差および光沢度の測定を，塗布後材齢 112 日において中性化深さの測定を行った。また，樹脂に関しては塗布後 1 日乾燥させた後，圧縮強度試験を行った。

2.4 実験結果

(1) 圧縮強度

試験は JIS A 1107 に準拠して行った。**図－1** に圧縮強度の試験結果を示す。シラン系 A~C と有機系 L を除く含浸材および全ての樹脂について，無塗布と同程度以上の圧縮強度を示した。特に，ケイ酸塩系 H，I，および K に関しては 1.3 倍前後の強度回復が見られたが，この 3 種の含浸材はいずれも湿潤養生したものであり，水分の供給によって基材内部のアルカリ成分と含浸材との反応が促進され，強度増進効果が高まったと推察される。

(2) 中性化深さ

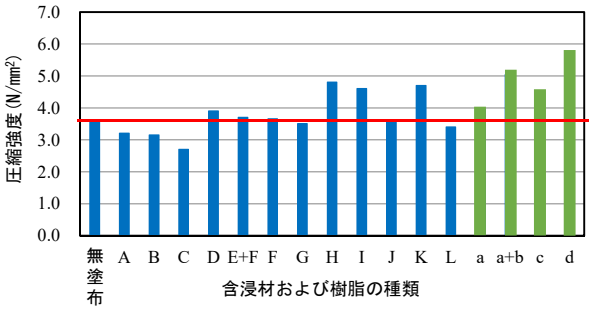
測定は JIS A 1152 に準拠して行った。**表－4** に中性化深さの測定結果を示す。なお，シラン系 C については，強度試験時に試験体が破損したため，記載していない。**表－4** より，混合系，ケイ酸塩系，および有機系について，無塗布の中性化深さよりも小さい値を示していることが確認された。特に，ケイ酸塩系においては気中養生よりも湿潤養生したものの方が中性化の進行が抑制されていることが確認された。

(3) 色差

色差は，$L^*a^*b^*$表色系（JIS Z 8729）に準じて，試験体側面中央 4 箇所について塗布前後の色差 ΔE を測定し，その平均を用いた。なお，ΔE^*の算出方法は式(1)による。

$$\Delta E^*=(\Delta a^{*2}+\Delta b^{*2}+\Delta L^{*2})^{1/2} \quad (1)$$

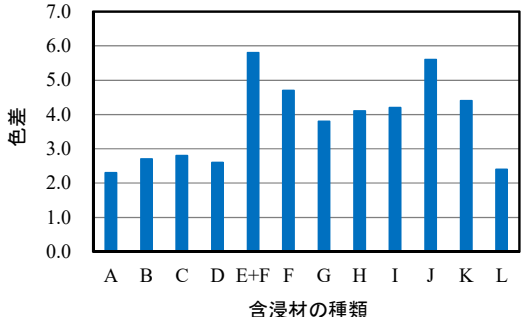
図－2 に色差の測定結果を示す。これより，シラン系



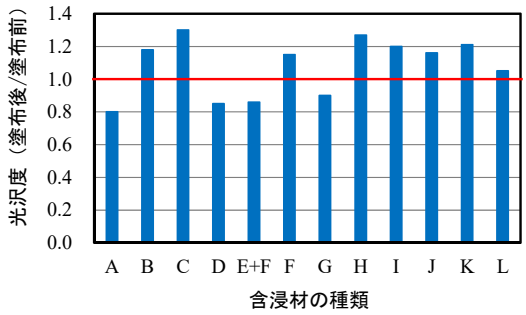
図－1　圧縮強度試験結果（塗布後材齢 28 日）

表－4　中性化深さ測定結果（単位：mm）

無塗布	シラン系				混合系		有機系
	A	B	D	平均	E+F		L
19.9	17.8	22.7	23.2	21.2	17.8		16.4
ケイ酸塩系（気中養生）				ケイ酸塩系（湿潤養生）			
F	G	J	平均	H	I	K	平均
16.9	17.9	16.9	17.2	13.3	16.0	12.9	14.1



図－2　色差測定結果



図－3　光沢度測定結果

A~D および有機系 L と比較して，混合系 E+F およびケイ酸塩系 F~K における塗布前後の色味の変化が大きいことが確認された。

(4) 光沢度

JIS 規格に準拠したハンディ光沢計を用いて，(C) と同様の箇所について測定を行った。**図－3** に光沢度の測定結果を示す。全体的にばらついた値を示し，含浸材の種類との相関は得られず，有意な傾向は認められなかった。

3.【実験 2】含浸材を用いた最適工法に関する検討

3.1 実験概要

本実験では，主にケイ酸塩系の含浸材に対して反応を

促進させることを目的とし，後述する 2 つの工法を用いて $Ca(OH)_2$ 0.15%水溶液をアルカリ補助材として事前に塗布した。試験体は実験 1 と同様のモルタル試験体を，含浸材は**表－1** 中の含浸材から**表－5** に示す 5 種類を選んで用いた。実験 1 よりシラン系含浸材からは全ての測定データが揃っている B および D の 2 種類を，ケイ酸塩系含浸材からは塗布後の養生方法が異なる I および J と実験の都合上，実験 1 では検討ができなかった M の 3 種類を用いた。なお，測定項目は圧縮強度のみとした。

3.2 実験方法

(1) シリーズⅠ

アルカリ補助材をあらかじめ刷毛によって試験体全面に塗布し，気中にて 1 日乾燥させた後，同体積の含浸材を塗布した。

(2) シリーズⅡ

所定の容器に試験体が完全に浸漬するようにアルカリ補助材を入れ，デシケータを用いて 0.08MPa の減圧環境下で 6 時間脱気した。1 日間乾燥させた後，同様に含浸材に浸漬させ，同一環境で再び脱気した。塗布後材齢 28 日において圧縮強度試験を行った。

3.3 実験結果

シリーズⅠおよびシリーズⅡの圧縮強度試験結果を**図－4** に示す。両シリーズを比較すると，全ての含浸材についてシリーズⅡによる圧縮強度がシリーズⅠと同程度以上の値を示していることから，減圧含浸工法が有効である可能性が確認された。また，湿潤養生したケイ酸塩系 I が最も高い数値を示していることから，実験 1 と同様にケイ酸塩系含浸材の湿潤養生が有効であることが明らかとなった。一方，アルカリ補助材の効果については，有意な結果は得られなかった。

4.【実験 3】アルカリ補助材の選定に関する検討

4.1 実験概要

実験 2 においてアルカリ成分の有無による差異が十分に認められなかったことから，適当な補助材を選定することを目的とした事前実験を行った。

4.2 実験方法

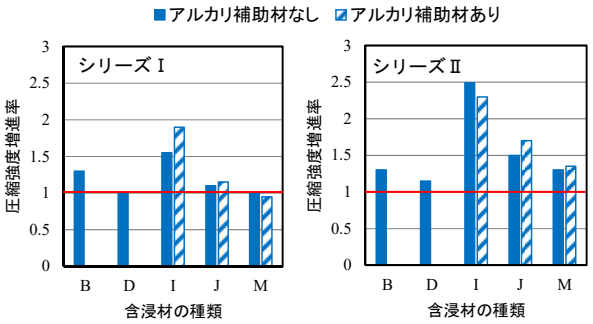
本実験で用いる補助材には，$Ca(OH)_2$ 水溶液のほか，セメント粉末を多量の水に溶かした水溶液（以下，セメント懸濁液）を比較用に用いた。セメント懸濁液は，$Ca(OH)_2$ 飽和水溶液と同等の pH になるように JIS Z 8802 に準じて質量パーセント濃度を調整した。この 2 種類の水溶液を**表－1** 中の含浸材 I とそれぞれ体積比 1:1 で混合した後，3. 2 節と同様の減圧環境下で 24 時間脱気した。

4.3 実験結果

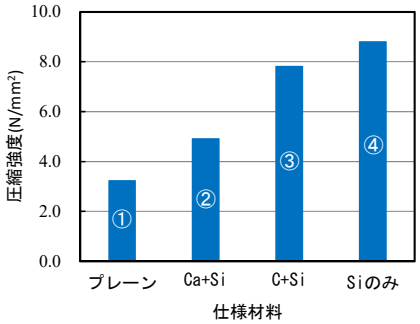
減圧後 3 日間乾燥させた後に圧縮強度試験を実施し，それぞれの圧縮強度を比較した結果を**図－5** に示す。横

表－5　試験体一覧

含浸材		養生方法	実験 2	
分類	記号		$Ca(OH)_2$ 有り	$Ca(OH)_2$ 無し
シラン系	B	気中	－	○
	D	気中	－	○
ケイ酸塩系	I	湿潤	○	○
	J	気中	○	○
	M	気中	○	○



図－4　圧縮強度の比較およびアルカリ補助材の効果



図－5　圧縮強度試験結果

軸は左から順に①プレーン，②$Ca(OH)_2$ 水溶液と含浸材の混合溶液，③セメント懸濁液と含浸材の混合溶液，④含浸材のみを含浸させたものを示している。②～④はいずれも①より高い値を示し，特に②と③の比較では，③が②の 1.6 倍の圧縮強度増進効果を発揮した。これは，外来的なアルカリ成分よりもセメント由来の水溶液のほうが基材モルタルとの反応性が良好であるためだと考えられる。また，②と③がいずれも④より低い値を示した原因としては，各補助材と含浸材を混合した時点で即座に反応物が形成され，液状の④と比較して試験体内部への含浸の可否に影響を与えたと推察される。

5.【実験 4】アルカリ補助材の最適濃度に関する検討

5.1 実験概要

実験 3 より，ケイ酸塩系含浸材にセメント懸濁液を作用させることで反応性が高まることを確認した。そこで本実験では，セメント懸濁液の最適濃度を選定することを目的として，より詳細な検討を行った。

5.2 実験方法ならびに実験結果

4. 2 節により明らかとなった，$Ca(OH)_2$ 飽和水溶液と同

等のpHを示すセメント懸濁液の質量パーセント濃度は，およそ 8%であった。この濃度を上限とし，0.5，1，2，4，6，および 8%の計 6 種のセメント懸濁液を用意し，それぞれの上澄み液の pH を測定した（**表－6**）。これより，セメント濃度が 2%を超えると pH はほとんど変化しないことが確認された。このうち 1，2，4，および 8%の 4 種について，4.2 節と同様の手順で含浸材との混合溶液を作製し，同一環境下で 24 時間の減圧含浸を行った。乾燥期間 1 週を設けて圧縮強度試験を実施した結果を**図－6** に示す。混合溶液の濃度が 2%の時が最も圧縮強度が高く，それ以降は濃度の上昇とともに圧縮強度が低下していくことが確認された。

また，先の 6 種のセメント懸濁液を別途作製し，経時変化を観察したところ，**図－7** に示すように混合溶液の濃度が 2%までは溶液全体が均一に白濁しているのに対し，4%を超えると白いゲル状の反応物が生じていることが確認された。このことからも，混合溶液の濃度 2%を境に溶液内での化学反応に変化が生じている可能性が示唆される結果となった。

6.【実験 5】含浸材および樹脂を用いた最適工法の検討

6.1 実験概要

実験 3, 4 の結果から，圧縮強度の増進が最も期待できるアルカリ補助材として 2%のセメント懸濁液を選定した。含浸材には，実験 1 で圧縮強度増加効果が高かった**表－1** 中の養生方法が湿潤養生であるケイ酸塩系 I, K を，樹脂には**表－2** 中の c に加え，新たに 1 液型ポリウレタン系樹脂 e を用いた。試験体は 2.1 節と同様の調合のモルタル試験体を作製し，形状は**図－8** に示すように測定項目ごとに 3 種類に分類した。先の実験 3, 4 においては形状 C の試験体を用いて検討を行った。

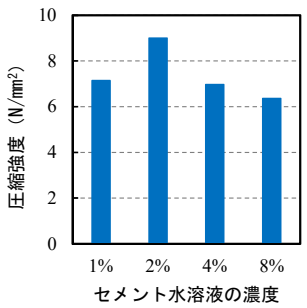
本実験の水準を**表－7** に示す。アルカリ補助材の有無，アルカリ補助材を含浸させる順序，養生方法の 3 点を主なパラメータとし，それぞれの項目が圧縮強度の増進に対して有効であるかを検証する。

6.2 実験方法

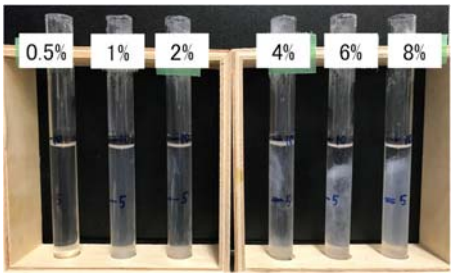
実験の流れを**図－9** に示す。アルカリ補助材もしくは含浸材を減圧（以下，一次減圧）後，3 日間の乾燥期間を設けて再び減圧した（以下，二次減圧）。アルカリ補助材のみおよび含浸材のみを含浸させるものに関しては，一次減圧のみを行った。減圧時間は一次・二次減圧ともに 24 時間とし，減圧後の養生方法については 7 日間の湿潤養生後に 21 日間気中養生するものと，28 日間気中養生するものとに区別した。最終減圧から 28 日経過後，各種測定・試験を実施し，各項目について検討した。一方，樹脂に関しては粘性や硬化時間に鑑みて 1 時間の減圧とし，減圧後は長期養生せず，翌日に硬化を確認後，すぐ

表－6　セメント懸濁液の濃度と pH の関係

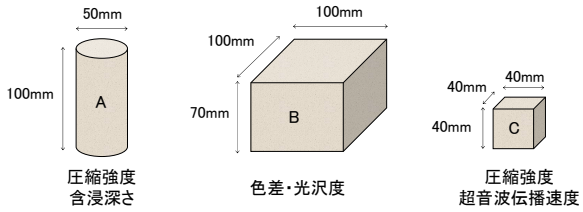
セメント濃度	pH
0.5%	11.91
1%	11.98
2%	12.03
4%	12.02
6%	12.01
8%	12.02



図－6　圧縮強度試験結果



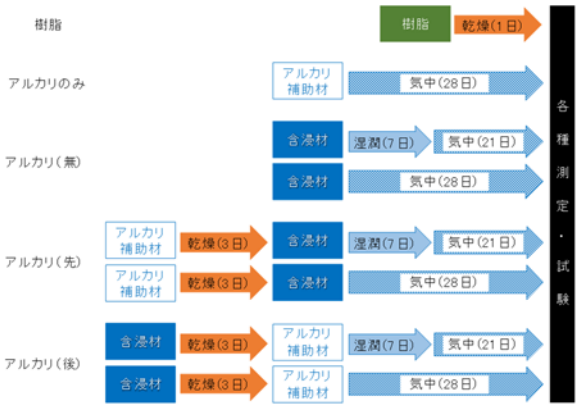
図－7　混合後 4 週を経過した各溶液の様子



図－8　測定項目と試験体形状

表－7　実験水準

	アルカリ（無）		アルカリ（先）		アルカリ（後）	
	湿潤あり	湿潤なし	湿潤あり	湿潤なし	湿潤あり	湿潤なし
無塗布	○					
補助材のみ	○					
含浸材 I	○	○	○	○	○	○
含浸材 K	○	○	○	○	○	○
樹脂 c	○		－	－	－	－
樹脂 e	○		－	－	－	－



図－9　実験の流れ

に測定・試験を実施した。また，すべての試験体は打込みしてから温度 20℃，相対湿度 60%，CO_2 濃度 5%の環境チャンバーにて中性化を促進させ，全断面が中性化した状態で用いた。これは，竣工後長い年月を経過した建造物の中性化状況を考慮している。

6.3 測定項目

2.4 節と同様の方法で圧縮強度，色差，および光沢度を測定するほか，以下のように質量変化，含浸深さ，おおよび超音波伝播速度について測定する。

(1) 質量推移

すべての試験体について，初期状態，一次・二次減圧前後，28 日経過後の質量変化を計測し，その推移から含浸材および樹脂の含浸割合を算出した。

(2) 含浸深さ

本実験では，試験体にフェノールフタレイン溶液を噴霧することで含浸深さを検討した。これは，減圧により試験体の比較的内部までアルカリ成分が含浸することと，全断面中性化した試験体を用いているため外部から付与されたアルカリ成分を直接評価できることから，本実験において有効な手段と言える。すなわち，フェノールフタレインによる呈色域を含浸材またはアルカリ補助材の含浸域として評価することとした。一方，樹脂に関しては硬化後に樹脂自体が変色するため，その変色域を含浸深さとした。

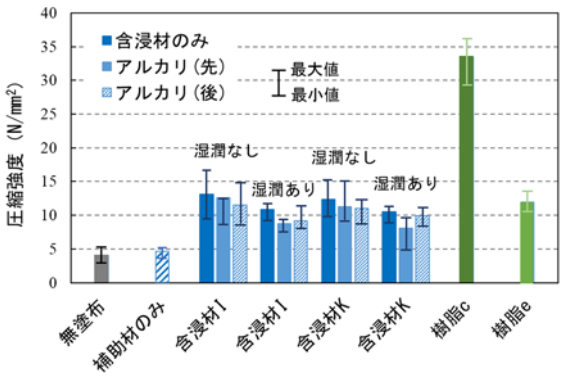
(3) 超音波伝播速度

本研究が対象とする蔵 [1]に本手法を適用した場合に得られた圧縮強度増進効果を原位置で評価する手法の 1 つとして，非破壊試験である超音波試験に着目した。ここでは超音波試験機を用いて透過法により超音波伝播速度を測定し，評価の可能性について検討した。

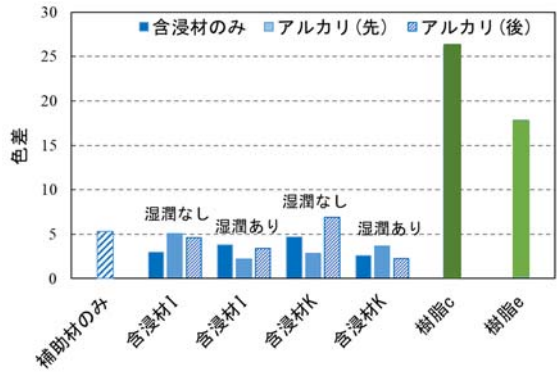
6.4 実験結果

(1) 圧縮強度

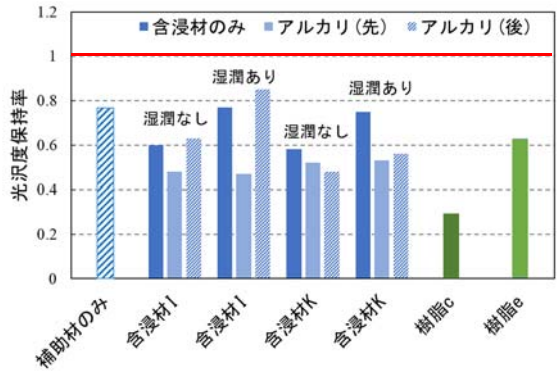
圧縮強度試験結果を**図－10** に示す。これより，アルカリ補助材だけでは強度の増進には効果がないことが示された。また，含浸材 I と含浸材 K について比較すると，含浸材 I の方がわずかに高い値を示した。また，含浸材 I, K ともに，湿潤をさせた場合はアルカリ補助材を後から，逆に湿潤をさせない場合はアルカリ補助材を先に含浸させることにより圧縮強度が高くなることが確認された。いずれの場合も含浸材のみを含浸させたものは両者の値を上回り，最も高い圧縮強度を示した。これは，一次減圧により試験体の空隙が充填され，二次減圧において試験体内部まで含浸せずに反応が促進されなかったためだと考えられる。さらに，いずれの含浸材も湿潤をさせないほうがより高い圧縮強度を示すことが明らかとなった。これは，水分の供給によって含浸材もしくはアルカリ補助材が溶脱し，試験体表層の組織が脆弱化



図－10　圧縮強度試験結果



図－11　減圧前後の色差



図－12　減圧前後の光沢度保持率

したのではないかと推察される。全体的に見れば，含浸材の種類や湿潤の有無によらず無塗布に対して 2～3 倍の強度増進効果が得られていることから，ケイ酸塩系含浸材が強度増進に効果的であると言える。一方，樹脂に関してはエポキシ系の樹脂 c が 33.5N/mm² という非常に高い数値を示し，無塗布に対して 8 倍もの圧縮強度を発現した。

(2) 色差・光沢度

含浸前後の色差・光沢度の比較をそれぞれ**図－11** および**図－12** に示す。まず色差について，樹脂はいずれの種類も色差が大きくなり，特に樹脂 c が極めて高い数値を示した。そのほかについては，含浸材の種類や湿潤の有

無，アルカリ補助材の順序による明確な傾向は捉えられないが，いずれも色差は小さく，外観の変化に与える影響は小さいものと考えられる。次に光沢度については，こちらも明確な傾向は認められないものの，全体的に光沢度は下がった。特に樹脂 c が最も低い値を示し，色差の結果と併せて外観の変化に最も大きな影響があるということが確認された。

(3) 質量変化

各試験体の減圧前後の質量推移を**表－8** に示す。一次減圧による増分は樹脂が 10～11%，アルカリ補助材が 12～13%，含浸材が 14～16%となり，含浸材がやや高い結果となった。また，アルカリ補助材を先に含浸させた場合，二次減圧までに質量が初期状態まで戻るのに対し，後から含浸させた場合は 7%程度が残存していることが示された。最終的な増分はいずれも 5～7%程度となった。

(4) 含浸深さ

一例として含浸材 I における含浸深さ試験を行った結果を**図－13** に示す。アルカリ補助材のみの試験体はわずかに赤紫色を呈し，その他の試験体はいずれも均一に赤紫色を呈した。特に，含浸材のみの試験体はいずれも呈色反応が色濃く，圧縮強度試験の結果に対応するような結果が得られた。また，図中に水色を付した試験体は湿潤養生を施したものであるが，アルカリ補助材を先に含浸させた試験体について，湿潤により赤紫色が淡くなっていることが確認された。

(5) 超音波伝播速度

図－14 に圧縮強度と超音波伝播速度との関係を示す。寄与率は 0.73 となり，両者には高い相関があることが示された。このことから，含浸材による強度増進効果を低強度モルタルにおいても非破壊的に評価可能であることが示され，実構造物における圧縮強度増進効果の推定に超音波試験が有効である可能性が考えられる。

7. まとめ

本論文によって得られた知見を**表－9** に示す。

1.減圧環境下でアルカリ刺激剤，含浸材および樹脂を含浸させることで，刷毛による塗布よりも圧縮強度が増進することが確認された。

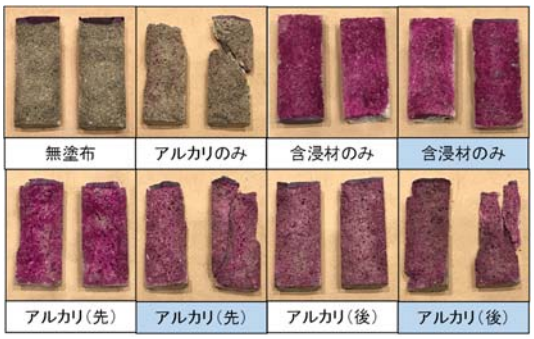
2.含浸材を刷毛により塗布する場合においては湿潤養生が有効であったが，減圧による場合では逆効果であることが確認された。

3.含浸材による強度増進効果は，超音波試験によって非破壊的に評価できることが確認された。

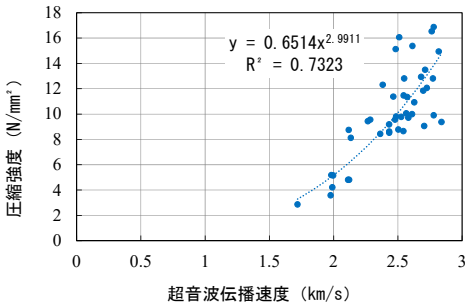
このことから，強度増進効果は樹脂の方が高いが，外観への影響が大きく，含浸材は外観への影響は小さいが強度増進効果は樹脂よりも低いことが確認できた。実構造物への適用においてはこれらの特徴を踏まえ，適用箇所に応じて選定することが可能であると考えられる。

表－8　質量変化（単位：%）

		初期状態	一次減圧増加率	乾燥後残存率	二次減圧増加率	最終残存率
		0	12			0
含浸材のみ	含浸材I・湿潤○	0	15			6
	含浸材K・湿潤×	0	16			7
	含浸材I・湿潤○	0	15			5
	含浸材K・湿潤×	0	16			7
アルカリ（先）	含浸材I・湿潤○	0	13	0	15	5
	含浸材K・湿潤×	0	12	0	14	6
	含浸材I・湿潤○	0	12	0	15	5
	含浸材K・湿潤×	0	12	0	15	5
アルカリ（後）	含浸材I・湿潤○	0	15	7	8	5
	含浸材K・湿潤×	0	14	7	7	5
	含浸材I・湿潤○	0	15	7	8	6
	含浸材K・湿潤×	0	15	7	8	6
樹脂c		0	10			
樹脂e		0	11			



図－13　含浸深さ測定結果



図－14　圧縮強度と超音波伝播速度の関係

表－9　含浸材料および工法の特徴

	含浸材料		工法	
	含浸材	樹脂	塗布	減圧
強度	○	◎	△	◎
外観への影響	△	×	－	－

謝辞

本実験の遂行にあたって，株式会社八洋コンサルタント　田中章夫様にご指導を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 大塚亜希子，今本啓一，野口貴文ほか 5 名：駒込樹林館に所在する築約 100 年の鉄筋コンクリート-木複合構造の蔵の構法的特徴と健全性に関する調査研究，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.169-172，2016.3